

DOSAGE DES ELEMENTS EN TRACE DES CALCAIRES AU SERVICE DE
L'ARCHEOLOGIEAnnie BLANC¹, Lore HOLMES², Garman HARBOTTLE²

1 : Laboratoire de recherche des Monuments historiques, 29, rue de Paris, 77420
CHAMPS-sur-MARNE, France

2 : Brookhaven National Laboratory, Chemistry Dept. P.O. Box 5000, UPTON, NEW
YORK 11973

ABSTRACT

Numerous quarries in the Lutetian limestone formations of the Paris Basin provided stone for the building and the decoration of monuments from antiquity to the present.

To determine the origin of stone used for masonry and sculptures in these monuments, a team of geologists and archaeologists has investigated 300 quarries and collected 2300 samples. Petrographic and paleontologic examination of thin sections allows geologists to distinguish Lutetian limestones from Jurassic and Cretaceous limestones. Geologists also seek to formulate hypotheses regarding the origin of Lutetian limestones used for building and sculpture in the Paris region.

In the search for the sources of building and sculptural stone, the analytical methods of geologists are limited because often several quarries produce the same lithofacies. A new tool is now available, however, to attack questions of provenance raised by art historians. Because limestones from different sources have distinctive patterns of trace-element concentrations, compositional analysis by neutron activation allows us to compare building or sculptural stone from one monument with stone from quarries or other monuments. This analytical method subjects a powdered limestone sample to standard neutron activation analysis procedures at Brookhaven National Laboratory. With the help of computer programs, the compositional "fingerprints" of Lutetian limestones can be determined and stored in a database. The limestone database contains data for approximately 2100 samples from monuments, sculptures and quarries. It is particularly rich in samples from the Paris Basin.

Results .Compositional analysis allows us to distinguish the Lutetian limestone used by stone masons during the medieval period from that used in XIX-century restorations at the basilica of Saint-Denis. The fine-grained limestone for sculpture of Notre-Dame de Paris was found to have come from the old quarries of Charenton (east of Paris) rather than from western sites. Limestones from Languedoc were analysed to compare the quarries of Bois des Lens and Saint-Martin-de-Londres with the sculpture from Saint-Guilhem-le-Désert.

Future work. Future plans for the project include analysis of more samples from sculptures in American and French museums. The more samples in the database the more useful it will be for curators and art historians.

RESUME

Un grand nombre de carrières ouvertes dans les calcaires lutétiens du Bassin parisien ont donné la pierre de construction et de décoration des monuments, depuis l'Antiquité jusqu'à nos jours.

Afin de déterminer la provenance des pierres utilisées dans les maçonneries et en sculpture dans les monuments, une équipe de géologues et d'archéologues ont étudié plus de 300 carrières et récolté environ 2300 échantillons. L'observation en lames minces au microscope permet aux géologues de distinguer les calcaires lutétiens de ceux du Crétacé ou du Jurassique. Les géologues tentent aussi de proposer des hypothèses sur les carrières d'origine des calcaires lutétiens utilisés dans les monuments de la région parisienne.

Dans cette recherche de la provenance des pierres de construction et de sculpture, les méthodes d'analyses des géologues se heurtent à des limites, car plusieurs carrières peuvent donner le même lithofaciès. Un nouvel outil a été mis au point pour répondre aux questions soulevées par les historiens d'art. Etant donné que les calcaires de différentes carrières ont des concentrations en éléments en trace spécifiques, les analyses par activation neutronique vont permettre de comparer les compositions des pierres de construction ou statuaire d'un monument avec celles des carrières ou d'un autre monument. A l'aide de programmes informatiques, les cartes d'identité de la composition des calcaires lutétiens ont été établie et stockées dans une base de données. La base de données des calcaires contient les compositions d'environ 2100 échantillons provenant de monuments, de sculptures et de carrières. Elle est particulièrement riche en analyses sur le Bassin parisien. Cette méthode analytique se pratique au Brookhaven National Laboratory, à partir de poudres de calcaires et de standard, exposés à un flux de neutrons.

Résultats. Les analyses des pourcentages en éléments en trace ont permis de distinguer les calcaires lutétiens de la construction médiévale, de ceux des restaurations du XIXe siècle, à la basilique de Saint-Denis. Elles ont permis aussi d'établir que le calcaire fin, utilisé pour la sculpture à Notre-Dame de Paris, a été pris plutôt dans les anciennes carrières de Charenton (à l'est de Paris) qu'en des sites plus à l'ouest.

Des calcaires du Languedoc ont aussi été analysés pour comparer ceux des carrières du Bois de Lens et de Saint-Martin-de-Londres, avec les sculptures de Saint-Guilhem-le-Désert.

Travaux en cours. Les perspectives du projet sont de faire plus d'analyses sur des éléments des musées américains et français. Plus nombreuses seront les analyses dans la base de données, plus utiles seront nos réponses aux questions des conservateurs et historiens d'art.

Depuis 1980, une équipe rassemblant, des géologues de différentes disciplines (géologie structurale, sédimentologie et pétrographie), des historiens et des archéologues s'est constituée pour étudier les anciennes carrières de calcaire lutétien de Paris et ses environs. Le programme de travail comporte des campagnes de terrain dans ces anciennes carrières pour étudier les traces d'exploitation, relever les coupes géologiques dans ces niveaux exploités, prendre des échantillons de référence. Les observations sur le terrain sont complétées par un travail de cartographie qui permet de comprendre les sens d'avancement des exploitation et en tirer des datations. Dans les échantillons sont taillées des lames minces pour études pétrographiques et une base de données informatique permet d'exploiter ces observations. La même équipe des carrières se déplace aussi pour étudier les monuments construits avec les calcaires lutétiens pour observer les utilisations des différents bancs, ce qui permet d'en déduire les connaissances techniques qu'avaient les bâtisseurs des différentes époques sur les

propriétés physiques des pierres de construction et leur comportement aux intempéries. Pour ce travail de relation entre la carrière et les monuments, une équipe de chimistes des USA travaille en collaboration avec les parisiens sur les échantillons pris dans les carrières et sur les monuments. Au départ, cette collaboration avec les USA a commencé pour répondre aux questions posées par les historiens d'art au sujet des sculptures françaises des collections des musées américains. Ces musées possèdent des oeuvres venant de France mais dont l'origine géographique est souvent inconnue. Grâce à la nature géologique de la pierre, il est souvent possible de définir sa région d'extraction, ce qui est un bon indice pour retrouver de quel monument elle provient.

Présentation géologique des calcaires lutétiens

Ces calcaires se sont déposés dans une mer chaude qui s'étendait sur la région parisienne il y a environ 45 millions d'années. Le nom lutétien, donné à cette formation, par les géologues du siècle dernier, vient de l'ancien nom de Paris, Lutèce. L'étage lutétien est divisé en plusieurs sous-étages (Blanc, Gély, 1997). A Paris, les calcaires du Lutétien supérieur, contenant des Miliolidés, (Foraminifères) ont fourni la pierre à bâtir et statuaire.

Les anciennes carrières de Paris ont été exploitées d'abord à ciel ouvert, dans l'Antiquité et au début du Moyen Age, sur les rives de la Seine et de la Bièvre (Blanc, Lorenz, 1988). Petit à petit les carriers ont commencé l'exploitation souterraine en galeries sous la campagne qui s'étendait hors des murs de la ville. A notre époque nous pouvons circuler sous la ville et observer les fronts de taille des anciennes carrières (Viré 1983 et 1993). Notre équipe de géologues et d'historiens des carrières a pu ainsi étudier les carrières dans Paris et sa région et prélever des échantillons pour étude en laboratoire.

Le principal résultats de ces recherches sur le terrain a été de reconnaître les bancs de calcaire apte à la construction (*lambourdes, bancs francs, roche*) et ceux qui ont été utilisés pour la sculpture (*liais, banc royal*). (figure 1, coupe).

Etude pétrographique des calcaires lutétiens.

L'observation des calcaires lutétiens en lames minces au microscope, montre qu'ils sont tous des calcaires à foraminifères à structure biopellitique, avec de petites différences lithologiques suivant les bancs, dans les carrières de Paris et de ses environs immédiats (Montrouge, Arceuil, Charenton, Saint-Maurice).

Les lambourdes sont des calcaires tendres, certains bancs sont riches en Miliolidés et contiennent aussi un autre une espèce de grand Foraminifère : *Orbitolites complanatus*. D'autres niveaux sont constitués uniquement de fins débris roulés d'organismes (bioclastes), liés entre eux par un ciment micritique peu abondant, laissant de nombreux pores entre les éléments.

Le liais se reconnaît à sa dureté, en lame mince, les bioclastes et les Miliolidés sont petits (0,1mm) et liés entre eux par une calcite microparticulaire remplissant tous les interstices..

Les bancs francs sont riches en Foraminifères (Miliolidés, Textularidés, etc.) mais on ne trouve jamais d'*Orbitolites*. Dans un même banc, épais d'environ 40 à 45 cm il se trouve une ou deux strates de 2 ou 3 cm d'épaisseur riches en empreintes de coquilles de cérithes (gastéropodes).

La roche est dure et très riche en coquilles de cérithes, régulièrement réparties dans toute l'épaisseur du banc et contient en plus des restes de tiges de Characés (plantes aquatiques). Parmi la production des anciennes carrières de Paris et de ses environs immédiats, il est donc possible, pour le géologue, de faire la distinction entre les bancs mais il ne peut établir avec

précision le lieu d'extraction du calcaire : Paris, Bagneux, Charenton, Carrières-sur-Seine ou Conflans-Ste-Honorine ou une carrière inconnue.

Dans la vallée de l'Oise, à environ 50 km au nord de Paris, des carrières dans le calcaire lutétien moyen ont aussi donné de la pierre pour les monuments de Paris, à partir du XIV^e siècle. Ce calcaire lutétien moyen, contient un fossile caractéristique, *Ditrupa strangulata* qui permet de le distinguer des calcaires du lutétien supérieur (à Miliolidés).

Les calcaires lutétiens ont été et sont encore exploités dans des carrières plus éloignées de Paris, ici aussi nous avons cherché des critères pour distinguer ces calcaires entre eux.

Près de Noyon, les calcaires contiennent de petits cristaux de quartz en proportion beaucoup plus grande que dans les autres carrières de la région parisienne.

A Laon et dans les anciennes carrières au sud de la ville, les calcaires lutétiens contiennent des Foraminifères (Nummulites, Orbitolites complanatus), des tubes de *Ditrupa* et des coquilles de mollusques bivalves.

A Reims, le calcaire lutétien provenait d'anciennes carrières situées à environ 15 km au Nord-ouest de la ville. Il est un peu plus jaune que celui des carrières parisiennes et contient, en plus des Miliolidea, de nombreux débris de coquilles blanches de mollusques bivalves. Il est encore exploité dans la carrière souterraine de Courville (Marne).

Les problèmes posés aux géologues sur l'origine des calcaires des monuments de la région parisienne

Les calcaires lutétiens, s'ils sont globalement identifiables sur un monument, posent le problème de la recherche de la carrière d'origine. En effet il est facile de reconnaître, grâce à une observation à la loupe, si le calcaire provient du Lutétien de la région parisienne ou s'il s'agit d'un calcaire jurassique de Bourgogne, de la Meuse ou du Poitou. De même à l'extérieur, où les conditions d'observation sont favorables, il est possible de reconnaître les différents lithofaciès utilisés dans un parement, pour les entourages des baies, les bandeaux, corniches et pour la sculpture. Des croquis sont levés pour repérer les dispositions de chaque lithofaciès dans le bâtiment. Le cas idéal étant d'avoir un relevé précis ou de bons tirages photographiques pour reporter les observations. De petits échantillons sont parfois prélevés (quand c'est possible) pour l'observation en laboratoire, à la loupe binoculaire et en lames minces au microscope. Ici intervient notre collection d'échantillons (2300 échantillons prélevés sur 320 coupes d'anciennes carrières de Paris et ses environs) et de lames minces qui sert de référence.

Les résultats des observations sur les monuments conduisent à démontrer l'évolution des connaissances des carriers et des bâtisseurs sur les propriétés des différents types de calcaire et leur utilisation dans les monuments anciens (Blanc, Gély, 1997).

Les méthodes d'analyse des géologues et des pétrographes ne sont pas suffisantes pour distinguer les calcaires fins à miliolidés du Lutétien supérieur (en particulier le liais), extraits des diverses anciennes carrières de Paris et de ses environs immédiats : Carrières-sur-Seine, Conflans-Sainte-Honorine, Courville et Senlis, (fig. 2) qui ont été utilisés pour la sculpture au Moyen Age.

Dans ces conditions, il n'était pas possible de proposer une origine précise aux statues, en calcaire lutétien de la région parisienne, qui se trouvent dans les Musées américains. C'est

ainsi que s'est établie une collaboration entre géologues et chimistes pour tenter de résoudre ce problème par l'analyse des éléments en trace dans les calcaires (Blanc, *et al.* sous presse)

Méthode d'analyse des éléments en trace par activation neutronique

L'avantage de cette méthode est qu'elle ne demande qu'un petit prélèvement de 1 g de poudre. La poudre est prélevée à l'aide d'un foret en carbure de tungstène (afin d'éviter une pollution par le fer). La surface de la pierre, avec ses impuretés est éliminée. La poudre propre est recueillie dans un papier cristal (changé à chaque prélèvement) puis introduite dans un petit tube de verre, elle est envoyée au laboratoire. Les échantillons sont séchés au four une journée, puis environ 100mg sont pesés avec précision et déposés dans une ampoule de quartz très pur qui est ensuite scellée. Des standards, dont la composition est connue sont inclus avec chaque groupe de calcaires à analyser. C'est la comparaison entre les résultats donnés par les standards et ceux des échantillons de composition inconnue qui permet de déterminer les concentrations en éléments de chacun des échantillons à analyser.

L'activation neutronique comporte deux étapes utilisant deux des réacteurs du Brookhaven National Laboratory. Le groupe d'ampoules est d'abord irradié par un flux de neutrons thermiques ($1,1 \times 10^{13}$ neutrons/cm²/seconde pendant 20 minutes) pour produire les isotopes radio-actifs de périodes courtes, manganèse, sodium et potassium. Une deuxième irradiation de 16 heures, par un flux de neutrons thermiques ($7,5 \times 10^{13}$ neutrons/cm²/sec), produit les isotopes de périodes longues, soit 16 éléments. Un comptage des énergies émises, après chaque irradiation permet de doser les éléments de périodes courtes, puis ceux de périodes longues, le premier quelques heures après l'irradiation, le second, après un délai de huit à neuf jours.

Les spectres des éléments présents dans les calcaires et dans les standards sont enregistrés et dépouillés par un détecteur de rayons gamma au germanium hyperpur, associé à un bloc-mémoire. Les données sont ensuite traitées par informatique. Les résultats sont obtenus avec une précision de 5 à 10% suivant les éléments.

Les pourcentages en éléments en trace de chaque échantillon de calcaire sont présentés sous forme de profil qui constitue une carte d'identité. Les comparaisons entre ces profils permet de regrouper les échantillons similaires. Le degré de similitude est déterminé statistiquement. Il est donc intéressant de travailler à partir du plus grand nombre possible d'échantillons sur un monument ou une carrière afin d'avoir des références précises pour identifier les provenances des sculptures d'origine inconnue. La base de données contient les résultats d'analyses sur 2100 échantillons de calcaire.

Des diagrammes regroupant les résultats par carrière ou par monument permettent de montrer les différences et les ressemblances chimiques de ces divers calcaires (Holmes *et al.*, 1986).

Les résultats

Les analyses des éléments en trace dans les calcaires permettent d'établir des distinctions entre les calcaires fins (en particulier le liais, utilisé en sculpture) présentant le même faciès lithologique (Holmes, Harbottle, 1994a).

Exemples

A Paris et dans ses environs des prélèvements ont été faits dans les anciennes carrières :

- sous le 5^e arrondissement (près du Val-de-Grâce),
- à Carrières-sur-Seine
- à Conflans-Saint-Honorine
- à Courville

Le premier diagramme (fig 3a), indique qu'il est possible de différencier les calcaires provenant de ces quatre anciennes carrières (Holmes, Harbottle, 1994b).

Le second diagramme (fig. 3b) permet de montrer que les prélèvements sur les sculptures des portails de la façade de Notre-Dame de Paris (Taralon, 1991) peuvent provenir des anciennes carrières de Charenton.

Les échantillons pris dans des éléments restaurés sont en dehors du champ de Charenton.

A la basilique de Saint-Denis notre travail a continué avec P. Blum, (Blum 1994), il a été possible de distinguer les éléments du 12^e siècle de ceux du 19^e et aussi de faire la distinction entre les calcaires utilisés dans la crypte (début du 12^e siècle, ceux de la porte des Valois, côté nord (milieu du 12^e siècle) et ceux des portails de la façade ouest (fin du 12^e siècle).

Le troisième diagramme (fig. 4) montre qu'il est possible de distinguer les calcaires lutétiens utilisés pour la sculptures des cathédrales de Paris, Senlis et Reims.

Le quatrième diagramme (fig. 5) montre les domaines de trois groupes de carrières situées près de Senlis, près de Noyon et dans la vallée de l'Oise. Des statues des Musées américains ont pu retrouver leur origine : Le Moïse du Musée des Cloisters peut provenir de Noyon, comme la Vierge qui est encore à Noyon, tandis que la statue d'Aaron serait plutôt de Senlis (Little, 1994).

Autres travaux en France

Des études ont été faites en Bourgogne, avec N.Stratford, à Caen, avec L. Dujardin, à Bourges et à Saint-Guilhem-le-Désert, en relation avec des éléments qui se trouvent dans les musées américains.

Pour Saint-Guilhem-le-Désert, des échantillons ont été pris sur des éléments en calcaire fin et jaune de l'Eocène, déposés dans le Réfectoire de l'abbaye qui sert de petit Musée et dans d'anciennes carrières situées à Saint-Martin-de-Londres. Les analyses ont permis de vérifier la provenance des calcaires (Holmes, Harbottle, 1994) et de comparer les éléments qui se trouvent au Musée des Cloisters de New York avec ceux qui sont encore à Saint-Guilhem (diagramme fig. 6).

Le travail a été commencé aussi sur les anciennes carrières du Bois des Lens, avec Jean-Claude Bessac. Le projet consiste à essayer de distinguer les calcaires de ces différentes carrières du secteur du Bois des Lens afin de trouver quelles sont parmi elles, celles qui ont donné de la pierre pour les monuments du Moyen Age, et en particulier à Saint-Guilhem, pour les éléments de chancel. Des prélèvements complémentaires sont à faire dans les carrières.

De nouvelles études sont en cours sur les craies des cathédrales d'Amiens, de Beauvais et sur l'abbaye de Jumièges.

Dans ces différents sujets de travail, la même méthode a été utilisée, en région parisienne, pour le Bois des Lens et pour les monuments en craie. Les prélèvements de poudre de calcaire se font sur des sculptures en place (ou déposées) des monuments et dans les anciennes carrières. La difficulté est de retrouver ces anciennes carrières, cela demande un très grand travail sur le terrain. Ensuite les analyses des éléments en trace permettent d'établir les relations ou les incompatibilités entre les calcaires des carrières et des monuments. Ici encore

le travail est d'autant plus fructueux que la base de données contient une grande quantité de résultats d'analyses.

REMERCIEMENTS

ACKNOWLEDGEMENT

Analysis by neutron activation was made possible by generous grants from the Florence Gould Foundation, the Getty Grant Program, the Samuel H. Kress Foundation and the David L. Klein, Jr. Memorial Foundation, administered by The Metropolitan Museum of Art and the International Center of Medieval Art. It was carried out at Brookhaven National Laboratory under contract DE-ACO2-98CH10886 with the United States Department of Energy.

Bibliographie :

- BLANC, A. et GELY, J-P., 1997, Le Lutétien supérieur des anciennes carrières de Paris et de sa banlieue : essais de corrélations lithostratigraphiques et application à l'archéologie; *Pierres et Carrières, Journées Claude Lorenz, 17-18 novembre 1995*, Ass. des géologues du Bassin de Paris, Paris 1997, P175 à 181.
- BLANC, A., et LORENZ, Cl., 1988 - Etude géologique des anciennes carrières de Paris : son utilité pour la connaissance et la restauration des monuments.
Proceedings of an international symposium, Athens, 19-23 septembre 1988, P. Marinos et G. Koukis (eds) : *The engineering geology of ancients works, monuments and historical sites.*, A.Balkena, Rotterdam, p.639 à 647.
- BLANC, A., HOLMES, L., L. and HARBOTTLE, G., sous presse : Lutetian Limestones in French Monuments, Proceedings of ASMOSIA Vth INTERNATIONAL CONFERENCE, Museum of Fine Arts, Boston, June 11-15, 1998, sous presse.
- BLUM, P. Z., 1994, Fingerprinting the stone at Saint-Denis : A pilot study, *Gesta*, International Center of Medieval Art, vol. XXXIII/1, p.19-28
- HOLMES, L.L., LITTLE, C. T. , and SAYRE, E. V., 1986 - Elemental characterization of medieval limestone sculpture from Parisian and Burgundian sources, *J. Field Archeol.* , 13, 419-38
- HOLMES, L.L., HARBOTTLE, G., 1994 - Compositional characterization of French limestone : a new tool for art historians. *Archeometry*, 36, p. 25-39
- HOLMES, L.L., HARBOTTLE, G., 1994, Compositional Fingerprinting : New Directions in the Study of the Provenance of Limestone. *Gesta*, International Center of Medieval Art, vol.XXXIII/1, p. 10-18.
- HOLMES, L.L., HARBOTTLE, G., 1995. Limestone Sculpture from the Abbey at Saint-Guilhem-le-Désert : Compositional Analysis, *Etudes sur l'Hérault*, nouvelle série 10, p. 45-52 .
- LITTLE, C. T., 1994 : Searching for the Provenances of Medieval Stone Sculpture : Possibilities and Limitations. *Gesta*, International Center of Medieval Art, vol.XXXIII/1, p.29-37.
- TARALON J., 1991 - Observations sur le portail central et sur la façade occidentale de Notre-Dame de Paris. *Bull. Monumental*, tome 149-IV, p.414 à 417.

VIRÉ M., 1983 - Carrières et carriers au terroir de Saint-Jean-de-Latran à Paris, (XIIe, XVIe siècles), Thèse de doctorat de 3e cycle, Univ. de Paris I, 165 p., 53 pl.

VIRÉ M., 1993 - Approche historique des carrières de calcaire grossier sous le Val-de-Grâce à Paris, colloque *Carrières et constructions*, 117e congrès des Sociétés Savantes, Clermont-Ferrand, octobre 1992, Paris, p. 117 à 132

Figures

Captions

1 : Coupe géologique des anciennes carrières de calcaire lutétien de Paris avec le nom des bancs, dessin Cl. Lorenz,

Schematic diagram of ancient quarry in the Lutetian limestone formation of Paris, identifying stone layers.

2 : Carte du centre du Bassin parisien avec les emplacements des anciennes carrières de calcaire lutétien étudiées par notre équipe de géologues et d'historiens.

Map of Paris Basin showing locations of ancient quarries studied by our team of geologists and historians.

3a : Diagramme présentant (par une méthode d'analyse discriminante dans un espace pluridimensionnel) les pourcentages des éléments en trace, obtenus par activation neutronique, sur les échantillons de quatre anciennes carrières de calcaire lutétien de Paris et ses environs.

Plot of Canonical functions in Discriminant space (based on trace-element composition determined by neutron activation analysis) for samples from four ancient quarries in the Paris area in the Lutetian limestone layers of Paris and its environs.

3b : Diagramme présentant (par une méthode d'analyse discriminante dans un espace pluridimensionnel) les pourcentages des éléments en trace, obtenus par activation neutronique (NAA), sur les échantillons provenant des anciennes carrières de calcaire lutétien des environs de Paris et sur les échantillons provenant de la sculpture médiévale de Notre-Dame de Paris.

Plot in Discriminant space of trace-element composition determined by neutron activation analysis (NAA) for samples from ancient Lutetian limestone quarries in the Paris area and from medieval sculpture at Notre-Dame de Paris

4 : Diagramme présentant (par une méthode d'analyse discriminante dans un espace pluridimensionnel) les pourcentages des éléments en trace, obtenus par activation neutronique, sur les échantillons provenant de la sculpture médiévale des cathédrales de Reims, Paris et Senlis

Plot in Discriminal space of trace-element composition determined by NAA for stone from medieval sculpture at the cathedrals of Reims, Paris and Senlis.

5 : Diagramme présentant (par une méthode d'analyse discriminante dans un espace pluridimensionnel) les pourcentages des éléments en trace, obtenus par activation neutronique, sur les échantillons de quatre sculptures médiévales en calcaire lutétien des Musée américaines et sur ceux provenant des anciennes carrières des environs de Senlis, de Noyon et de la vallée de l'Oise.

Plot in Discriminal space of trace-element composition determined by NAA, showing that stone for four medieval sculptures in American museums is consistent with an origin in ancient quarries near Noyon, Senlis and the Oise valley.

6 : Diagramme présentant (par une méthode d'analyse discriminante dans un espace pluridimensionnel) les pourcentages des éléments en trace, obtenus par activation neutronique, montrant que les compositions des calcaires des sculptures de Saint-Guilhem-le-Désert sont comparables avec celles des échantillons des anciennes carrières de Saint-Martin-de-Londres () et du Bois des Lens (Δ).

Plot in Discriminant space of trace-element composition determined by NAA, showing that the composition of sculpture from Saint-Guilhem-le-Désert is consistent with an origin in quarries in the Bois des Lens region (Δ) and near Saint-Martin-de-Londres ().